

Міністерство освіти і науки України
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут»

ТЕПЛОВІДДАЧА ГОРИЗОНТАЛЬНОЇ ТРУБИ ПРИ ВІЛЬНОМУ РУСІ ПОВІТРЯ

Методичні вказівки
до виконання лабораторної роботи
для студентів
інженерно-технічних спеціальностей

Київ
НТУУ «КПІ»
2015

Тепловіддача горизонтальної труби при вільному русі повітря [Текст]:
Метод. вказівки до виконання лабораторної роботи для студентів інженерно-
технічних спеціальностей /Укл. В.В.Дубровська, В.І.Шкляр. – К.: НТУУ «КПІ»,
2015. – 24 с.

Рекомендовано вченою радою
Інституту енергозбереження та
енергоменеджменту, НТУУ „КПІ”

(Протокол № 8 від 30 березня 2015)

Н а в ч а л ь н е в и д а н н я

Тепловіддача горизонтальної труби при вільному русі повітря

Методичні вказівки

до виконання лабораторної роботи
для студентів інженерно-технічних спеціальностей

Укладачі: *Дубровська Вікторія Василівна, к.т.н, доцент,*
Шкляр Віктор Іванович, к.т.н, доцент

Відповідальний
редактор:
Студенець В.П., к.т.н., доцент

Рецензент:
Самійленко С.М., к.т.н., доцент

ЗМІСТ

Вступ.....	4
1 Мета і основні завдання роботи.....	5
2 Основні теоретичні відомості.....	5
3 Опис експериментальної установки.....	13
4 Заходи безпеки під час виконання лабораторної роботи.....	16
5 Порядок і рекомендації щодо виконання лабораторної роботи.....	17
6 Обробка експериментальних даних.....	18
7 Оцінка точності результатів досліджень.....	21
8 Звіт по роботі.....	22
9 Контрольні запитання.....	22
Література.....	24

ВСТУП

Процеси переносу теплоти і маси грають важливу роль в природі і сучасній техніці. Серед них помітне місце займає вільний конвективний теплообмін, що виникає в неоднорідному полі масових сил між твердою поверхнею, яка нагрівається або охолоджується, та рідиною.

З явищем теплообміну в умовах природної конвекції доводиться часто зустрічатись при розв'язуванні технічних задач (наприклад, при розрахунку теплових втрат трубопроводів, тепло- і електроопалювальних пристроїв, охолодженні різних виробів при металообробці, тощо).

В якості теплоносіїв використовують різні речовини: повітря, воду, газ, мастило, розплавлені метали і т.п. В залежності від фізичних властивостей цих речовин, процеси тепловіддачі протікають по-різному.

Відмінною характеристикою вільної конвекції є невисокі коефіцієнти тепловіддачі. Це приводить до значних габаритних розмірів пристроїв, в яких реалізується вільна конвекція.

1 МЕТА І ОСНОВНІ ЗАВДАННЯ РОБОТИ

Мета роботи - закріпити знання з теорії конвективного теплообміну в умовах вільної конвекції; ознайомитися з методикою експериментального визначення коефіцієнта тепловіддачі при вільному русі повітря в необмеженому просторі біля горизонтальної труби та розрахунком за критеріальним рівнянням.

Завдання

1. У процесі виконання експерименту визначити середні коефіцієнти тепловіддачі при вільному русі повітря біля горизонтальної труби залежно від температурного напору «стінка труби - навколишнє повітря».

2. Визначити коефіцієнт тепловіддачі, використовуючи критеріальне рівняння за умов експерименту та порівняти отримані результати з дослідними даними.

Виконання лабораторної роботи починають після поглибленого ознайомлення з методичними вказівками.

2 ОСНОВНІ ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ

В природі та техніці передача теплоти здійснюється теплопровідністю, конвекцією і тепловим випромінюванням.

Теплопровідність являє собою молекулярний перенос теплоти в тілах (або між ними) обумовлений змінністю температури у просторі.

Під конвекцією розуміють процес переносу теплоти при переміщенні мікрочастинок рідини чи газу в просторі з області з однією температурою в область з іншою температурою. При цьому перенос теплоти нерозривно пов'язаний з переносом самого середовища.

Теплове випромінювання – процес розповсюдження теплоти за рахунок

електромагнітних хвиль, обумовлений тільки температурою та оптичними властивостями тіла, яке випромінює; при цьому внутрішня енергія тіла (середовища) переходить в енергію випромінювання.

Процес переносу теплоти конвекцією та теплопровідністю називається конвективним теплообміном.

Процес теплообміну між поверхнею твердого тіла і рідиною, яка омиває її, називається конвективною тепловіддачею або тепловіддачею, а поверхня тіла, через яку переноситься теплота – поверхнею теплообміну. Під рідинами розуміють не тільки краплинні рідини, але і гази.

Сумісний процес перенесення теплоти теплопровідністю, конвекцією і випромінюванням називається складним або радіаційно-конвективним способом передачі теплоти (складним теплообміном) [1].

При складному теплообміні загальний тепловий потік Q включає конвективний Q_K і променевий Q_P теплові потоки:

$$Q = Q_K + Q_P. \quad (1)$$

Розрізняють два види руху рідини – вільний і вимушений, і, відповідно до цього, вільну і вимушену конвекцію.

Вільним називається рух рідини під впливом неоднорідного поля масових сил, які прикладаються до її частинок. Масові сили можуть бути обумовлені зовнішніми полями: гравітаційним, магнітним, електричним. Вільну конвекцію називають також природною конвекцією.

При теплообміні температура рідини змінна по її об'єму, тому виникає різниця густин і, як наслідок, різниця гравітаційних сил, які діють на гарячі і холодні шари рідини. Наприклад, при контакті повітря з нагрітим тілом воно нагрівається, стає легшим і витискується вгору холодними шарами повітря, які опускаються вниз під дією сили тяжіння.

Вимушеною конвекцією називається конвективний теплообмін при русі рідини під дією зовнішніх сил, які створюються за допомогою насосів, компресорів, вентиляторів і т.п.

Рух середовища біля твердих тіл при природній конвекції в значній мірі залежить від їх розташування в просторі і геометричних розмірів.

В процесі тепловіддачі режим руху рідини визначає механізм переносу теплоти.

При ламінарному режимі перенесення теплоти в напрямку нормалі до стінки здійснюється теплопровідністю.

При турбулентному режимі такий спосіб переносу теплоти зберігається лише в граничному шарі (або підшарі), а в середині турбулентного ядра перенос теплоти здійснюється шляхом інтенсивного перемішування частинок рідини, тобто конвекцією.

Для горизонтальних труб ламінарний режим руху повітря має місце в нижній частині труби. Протяжність ламінарного режиму залежить від діаметра труби. При інших рівних умовах, чим більше діаметр труби, тим вірогідніше руйнування ламінарного шару. У труб малого діаметру руйнування ламінарного шару відбувається вдалині від труби (див. рис.1а).

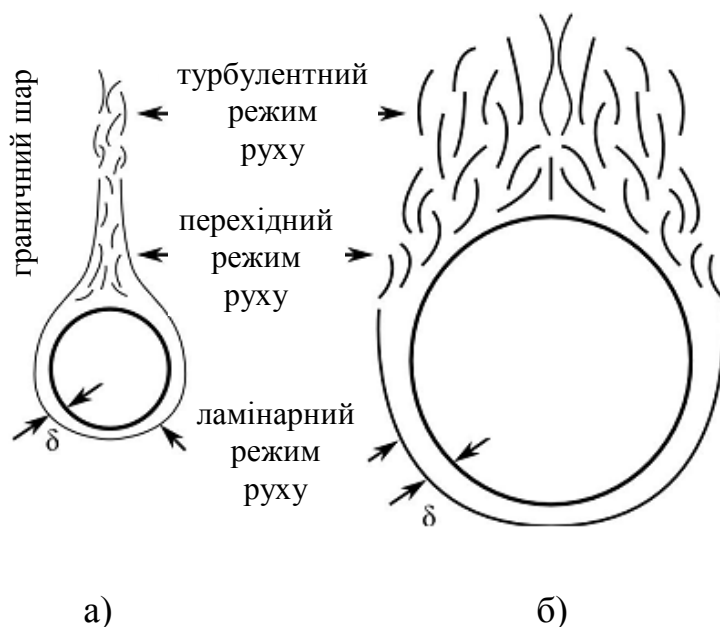


Рис.1 Структура вільного руху повітря біля нагрітих горизонтальних труб:

а) малого діаметра; б) великого діаметра.

У випадку нагрітої труби, шари повітря, які близько розташовані до неї, нагріваються шляхом теплопровідності (рис. 1). При цьому густина їх зменшується та виникає підйомна сила. Якщо геометричні розміри, що характеризують об'єм повітря, досить великі, то взаємодія потоків нагрітого повітря, що піднімається, та холоднішого, що витискує нагріте повітря, практично відсутня. Іншими словами, розміри простору, що займає повітря, не впливають на інтенсивність процесу, який в цьому випадку називають вільною конвекцією у необмеженому просторі.

В практичних інженерних розрахунках тепловіддачу описують законом Ньютона - Ріхмана.

Згідно закону Ньютона - Ріхмана тепловий потік Q від рідини до стінки чи від стінки до рідини пропорційний поверхні теплообміну F і різниці температур $\Delta t = (t_c - t_p)$ стінки і рідини:

$$Q = \alpha(t_c - t_p)F, [\text{Вт}]. \quad (2)$$

Різницю температур $(t_c - t_p)$ або $(t_p - t_c)$ називають температурним напором. Коефіцієнт пропорційності α , який входить в рівняння Ньютона – Ріхмана, називається коефіцієнтом тепловіддачі. Він враховує конкретні умови процесу тепловіддачі, які впливають на його інтенсивність.

Коефіцієнт тепловіддачі α характеризує інтенсивність теплообміну на границі рідина – стінка і чисельно дорівнює кількості теплоти, переданої в одиницю часу через одиницю поверхні, при різниці температур між поверхнею і рідиною в 1 К, $\text{Вт}/(\text{м}^2 \text{ К})$.

Коефіцієнт тепловіддачі α , на відміну від коефіцієнта теплопровідності λ , не є фізичним параметром середовища, а є складною функцією і залежить від багатьох факторів: швидкості руху рідини, режиму руху, фізичних параметрів рідини, температури рідини і тіла, форми і розмірів тіла, яке омивається:

$$\alpha = f(w, \lambda, c, \rho, a, \beta, v, t_p, t_c, \Phi, l_x, l_y, l_z, \dots), \quad (3)$$

де: w – швидкість рідини, $[\text{м}/\text{с}]$; ρ – густина рідини, $[\text{кг}/\text{м}^3]$; λ - коефіцієнт теплопровідності рідини, $[\text{Вт}/(\text{м} \text{ } ^\circ\text{C})]$; a - коефіцієнт температуропровідності рі-

дини, m^2/c ; ν - коефіцієнт кінематичної в'язкості рідини; $[m^2/c]$; c_p – питома масова ізобарна теплоємність рідини $[Дж/(кг \text{ } ^\circ C)]$; β - коефіцієнт об'ємного розширення рідини, $[1/K]$; l_x, l_y, l_z - лінійні розміри поверхні тіла, $[m]$; Φ - геометрична форма тіла.

Коефіцієнт тепловіддачі може змінюватися по поверхні теплообміну, і тому розрізняють *середній по поверхні* і *локальний або місцевий коефіцієнт тепловіддачі*.

В загальному випадку *середній по поверхні коефіцієнт тепловіддачі* визначається з рівняння:

$$\alpha = \frac{dQ}{(t_c - t_p) dF}. \quad (4)$$

Інтенсивність тепловіддачі оцінюється локальним коефіцієнтом тепловіддачі:

$$\alpha = \frac{q_k}{t_c - t_p}, \quad (5)$$

де q_k - густина конвективного теплового потоку, $Вт/м^2$:

$$q_k = \frac{dQ_k}{dF}. \quad (6)$$

Якщо необхідно визначити тепловіддачу в стаціонарних умовах по всій поверхні F , то:

$$\alpha = \frac{Q_k}{F(t_c - t_p)}. \quad (7)$$

Інженерний розв'язок задач конвективного теплообміну часто зводиться до визначення α і розрахунку кількості переданої теплоти.

Аналітичне визначення коефіцієнта тепловіддачі являє собою складну задачу, пов'язану зі складанням великої системи диференціальних рівнянь енергії (теплопровідності), суцільності(нерозривності) і руху, розв'язок якої або дуже складний або неможливий. Така система рівнянь описує незлічену кількість конкретних процесів.

Щоб виділити розглядуваний процес, до системи диференціальних рівнянь необхідно приєднати умови однозначності, які дають математичний опис

всіх особливостей даного процесу.

Для спрощення експериментального визначення, а також для аналітичних розрахунків конвективного теплообміну використовують теорію подібності – вчення про методи наукового узагальнення експериментальних даних окремих дослідів.

Теорія подібності встановлює подібність фізичних явищ і на цій основі дає можливість істотно скоротити число змінних. Вона визначає правила моделювання, які дозволяють замінити експериментальне вивчення реального об'єкту вивченням його моделі, виконаної в масштабі, зручному для проведення дослідів. Причому результати окремих дослідів можна поширити на всі об'єкти, подібні досліджуваному. Теорія подібності дає можливість представити систему складних диференціальних рівнянь, що описують конвективну тепловіддачу, у вигляді залежностей між безрозмірними комплексами, складеними з різнорідних фізичних величин. Такі комплекси називаються числами подібності (критеріями подібності) і можуть розглядатися як нові узагальнені змінні, число яких менше числа величин, з яких вони складаються.

Числа подібності отримують з аналітичних залежностей, що описують даний процес. При цьому нульова розмірність є характерною особливістю чисел подібності і може слугувати перевіркою правильності його складання.

Числа подібності прийнято позначати першими двома літерами прізвищ вчених, що внесли значний внесок в дослідження в області гідродинаміки і теорії теплообміну, наприклад, Re (Reynolds), Nu (Nusselt) та ін.

Для розрахунку конвективної тепловіддачі однофазних потоків найбільш часто застосовують наступні числа подібності:

1. Число Нуссельта:

$$Nu = \frac{\alpha_p \cdot l_0}{\lambda}, \quad (8)$$

де α_p - коефіцієнт тепловіддачі, **$Вт/(м^2 \cdot К)$** .

l_0 - визначальний (характерний) розмір, **$м$** .

Число Нуссельта характеризує теплообмін на границі «стінка-рідина» і

називається безрозмірним коефіцієнтом тепловіддачі.

2. Число Прандтля:

$$\text{Pr} = \frac{\nu}{a}. \quad (9)$$

Число Прандтля характеризує фізичні властивості рідини і є теплофізичним параметром рідини. Зазвичай значення чисел Прандтля наведені в таблицях. Відзначимо, що числа Прандтля краплинних рідин сильно залежать від температури, а числа Прандтля газів практично не залежать від температури та тиску.

3. Число Грасгофа:

$$\text{Gr} = \frac{g \cdot \beta \cdot \Delta t \cdot l_0^3}{\nu^2}, \quad (10)$$

де g – прискорення вільного падіння, м/с^2 .

Число Грасгофа характеризує підйомні сили, які виникають в рідині внаслідок різниці густини нагрітих і холодних частинок рідини, і пов'язує підйомні сили і сили в'язкості. Число Грасгофа характеризує вільний рух рідини або вільну конвекцію.

Застосування теорії подібності дозволяє узагальнити результати експериментальних досліджень тепловіддачі у вигляді критеріальних рівнянь для конкретного класу явищ. Критеріальні рівняння подібності встановлюють залежність визначуваного критерія Нуссельта від визначальних критеріїв (Pr , Gr). Як правило, ці рівняння наводяться у вигляді степеневих функцій.

Для крапельних рідин та газів критеріальне рівняння для обчислення теплообміну при вільній конвекції в необмеженому просторі без зміни агрегатного стану речовини в стаціонарних умовах має вигляд:

$$\text{Nu} = C \cdot (\text{Gr} \cdot \text{Pr})^n \left(\frac{\text{Pr}}{\text{Pr}_C} \right)^{0,25}, \quad (11)$$

де Pr , Pr_C – числа Прандтля, які знайдені за визначальною температурою і температурою стінки відповідно.

Рівняння (11) є емпіричними, і їх можна застосовувати тільки в тих межах

зміни чисел Pr і Gr , в яких проводився експеримент. При розрахунках коефіцієнта тепловіддачі за цими рівняннями визначальну температуру і розмір необхідно вибирати так, як це робилося при отриманні рівнянь. Тому в описі рівнянь подібності обов'язково вказується діапазон зміни визначальних чисел подібності та визначальні температура і розмір. Коефіцієнт пропорційності C і показник степеня n залежать від режиму руху середовища, який, у свою чергу, визначається добутком $Gr \cdot Pr$.

Значення C і n при вільній конвекції біля горизонтальних циліндрів (у тому числі й біля електричних проводів) вибираються за табл. 1 [2].

Таблиця 1

Режим руху	$Gr \cdot Pr$	C	n
Плівковий	10^{-5}	0,4	0
Перехідний	$10^{-5} \dots 5 \cdot 10^2$	1,18	0,125
Ламінарний	$5 \cdot 10^2 \dots 10^9$	0,54	0,25
Турбулентний	$10^9 \dots 10^{12}$	0,13	0,33

При виборі визначального розміру - l_0 , що входить до чисел Gr та Nu , намагаються вибрати такий розмір, який має найбільший вплив на досліджуваний процес.

У формулах (8,10) як характерний розмір для горизонтальних циліндричних тіл використовується діаметр ($l_0 = d$), а визначальна температура - середня температура граничного шару:

$$t_0 = t_M = \frac{t_C + t_P}{2}, \quad (12)$$

за якою в довідкових таблицях знаходять фізичні параметри середовища (λ , a , ν).

Взаємозв'язок процесів руху і теплообміну - характерна особливість даного явища. Збільшення вказаної різниці температур (температурного напору) веде до зростання різниці густин рідини і отже, до зростання швидкості її гравітаційного руху.

У загальному випадку коефіцієнт тепловіддачі буде залежати від напрям-

ку теплового потоку (від стінки чи до стінки). Напрямок теплового потоку враховується множителем $\left(\frac{Pr}{Pr_c}\right)^{0,25}$. Якщо рухомим середовищем є газ, то

$$\left(\frac{Pr}{Pr_c}\right) \approx 1 \Rightarrow \left(\frac{Pr}{Pr_c}\right)^{0,25} = 1.$$

Коефіцієнт об'ємного розширення повітря знаходимо за формулою для ідеального газу, 1/К:

$$\beta = \frac{1}{T_M}, \quad (13)$$

де $T_M = t_M + 273$ – визначальна температура, К.

3 ОПИС ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЇ УСТАНОВКИ

Експериментальна установка (рис. 2) призначена для визначення коефіцієнта тепловіддачі від горизонтальної труби до оточуючого повітря при нагріванні поверхні труби від 30 до 125 °С. Вона має бути розміщена в кімнаті з досить стабільною температурою повітря.

Основний елемент установки - горизонтальна труба, замість якої використовують трубчастий електронагрівач (ТЕН) довжиною $L = 594$ мм і зовнішнім діаметром $d = 13,5$ мм. Теплоізоляція ТЕНа на торцях забезпечується фарфоровими пробками, за допомогою яких він кріпиться на вертикальних стояках. Електроживлення ТЕНа здійснюється через проводи, розміщені в отворах стояків. Кількість виділеної та розсіяної в оточуюче середовище теплоти визначається за витратою електроенергії, що споживає ТЕН. Потужність нагрівача регулюється лабораторним трансформатором та вимірюється ватметром Д 50044 класу К=0,5.

Для зменшення променевої складової теплової потужності, що розсіюється, поверхня ТЕНа вкрита шаром нікелю, внаслідок чого ступінь чорноти в на-

прямі нормалі до поверхні становить не більше ніж 0,045.

Температура зовнішньої стінки ТЕНа вимірюється за допомогою шести хромель-алюмелевих термопар, розташованих рівномірно по довжині й по колу труби (термопари стандартного градуювання з чутливістю 41 мкВ/К та гранично допустимою похибкою не більше ніж 0,16 мВ за ГОСТ 3044-74). Електроди термопар виведені до перемикача, за допомогою якого вони по чергові підключаються до цифрового вимірювача температури 7, який перетворює електрорушійну силу в значення температур.

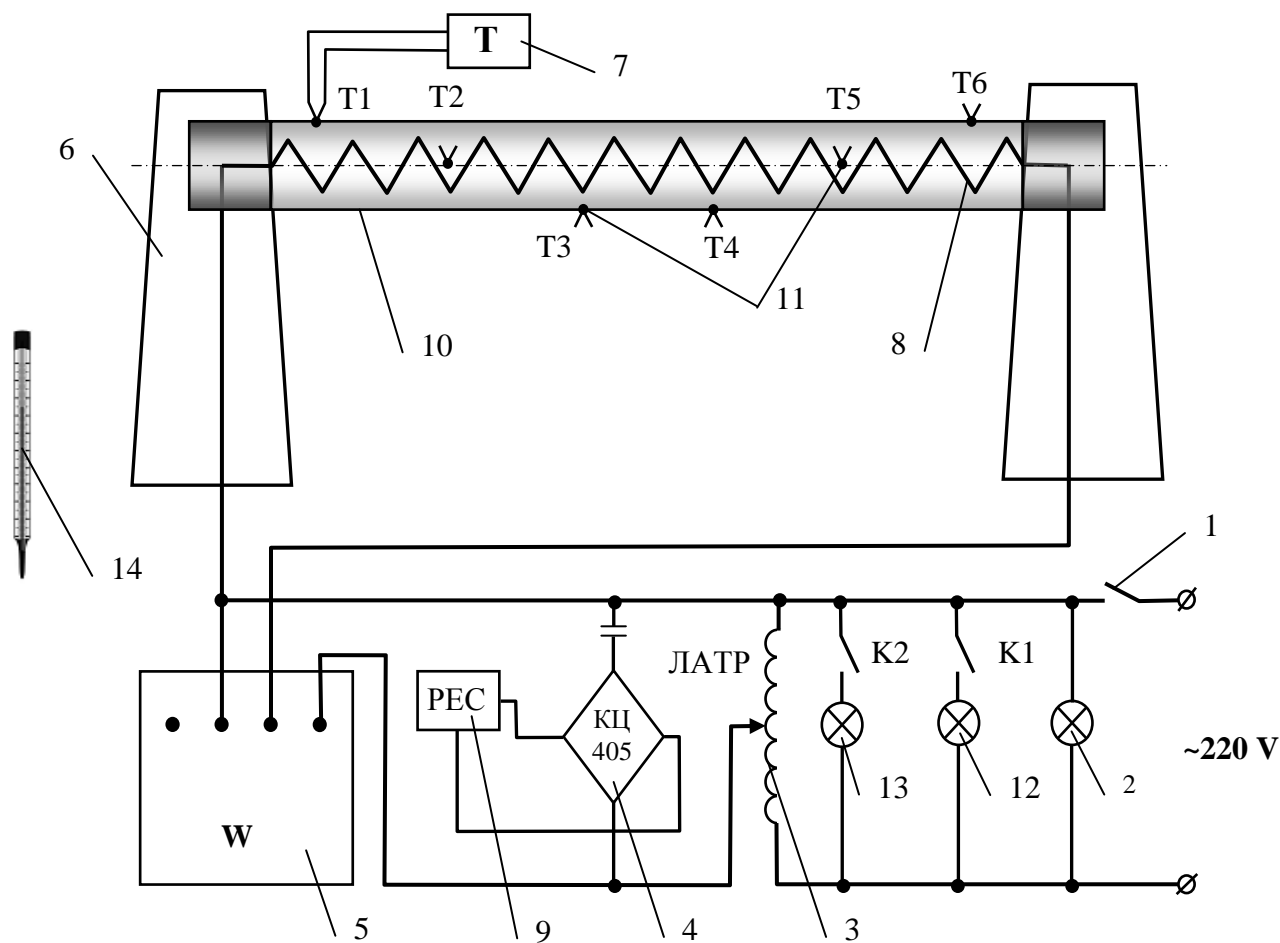


Рис. 2. Схема експериментальної установки:

1 - тумблер живлення; 2 - сигнальна лампа; 3 - ЛАТР; 4 - ланцюг електричного реле для світлових табло; 5 - ватметр; 6 - опора; 7 - мілівольтметр;
8 - спіраль нагрівача; 9 - реле; 10 - горизонтальна труба (ТЕН);
11 - гарячі спаї термопар; 12, 13 - світлові табло; 14 - термометр.

Термoeлектроди діаметром 0,2 мм ізолюються кремнеземною ниткою. Схема розташування термопар на ТЕНі показана на рис. 3.

Температура повітря визначається за термометром 14, що знаходиться у приміщенні лабораторії.

Установка забезпечує визначення α протягом виконання експерименту в діапазоні температур $\Delta t = 20 \dots 90$ °С з повною похибкою не більше ніж 0,6 Вт/(м²·К) або приблизно 7% (довірча ймовірність $P = 0,68$). При цьому в діапазоні Δt , що вказується, середньоквадратичне відхилення дослідних даних від розрахункових, визначене за критеріальним рівнянням, дорівнює 5 - 8%.

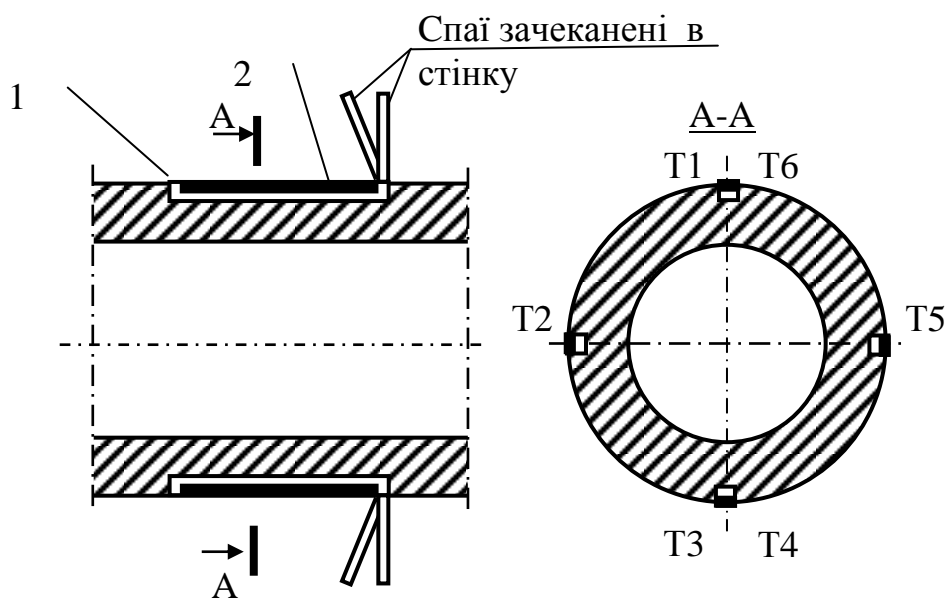


Рис. 3. Установка термопар на поверхні труби:

1- ізольовані електроди термопар; 2 - металева пластина.

Значення всіх величин потрібно змінювати в стаціонарному тепловому режимі. Максимальний час виходу установки на стаціонарний режим після включення - не більше 75 хв. Час стабілізації теплового режиму працюючої установки після підвищення температури стінки дослідної труби - не більше ніж 25 хв.

Максимально допустима температура поверхні дослідної труби не пере-

вищує 130 °C (~ 30 Вт навантаження на ТЕН).

Зміна потужності ТЕНа при коливанні напруги в мережі встановлюється не більше ніж 0,2...0,4 Вт.

Максимальна різниця температур між показами термопар на поверхні труби дорівнює 10...15 °C.

Мінімально допустимий час вимірювання (індикації) температури в окремій точці труби приладом А 565 - 2 с.

Променева частина потужності, що розсіюється, при температурах поверхні дослідної труби 40...120 °C не перевищує 4%.

4 ЗАХОДИ БЕЗПЕКИ ПІД ЧАС ВИКОНАННЯ ЛАБОРАТОРНОЇ РОБОТИ

Увага! Включення і виключення лабораторної установки проводиться тільки лаборантом або викладачем.

1. До виконання лабораторної роботи на установці допускаються лише студенти, що ознайомилися з методичними вказівками та правилами безпеки, підготували протокол до лабораторної роботи.

2. До одночасної роботи на установці допускається не більше п'яти студентів.

3. Дослідження проводяться лише під наглядом викладача чи лаборанта.

4. Категорично заборонено самостійно переключати систему регулювання режимами.

5. У разі виникнення будь-яких проблем необхідно терміново повідомити про це викладача.

5 ПОРЯДОК І РЕКОМЕНДАЦІЇ ЩОДО ВИКОНАННЯ ЛАБОРАТОРНОЇ РОБОТИ

Під час дослідів треба уникати різких рухів біля труби.

Після ознайомлення з експериментальною установкою вмикають тумблер живлення, після чого спалахує сигнальна лампа й табло цифрової індикації мілівольтметра (див. рис.2).

У процесі виконання лабораторної роботи необхідно отримати значення коефіцієнта тепловіддачі α для трьох - чотирьох теплових режимів, які задаються електричною потужністю ТЕНа за допомогою ЛАТРа та ватметра. Навантаження на ТЕН для кожного теплового режиму вибирають довільно в діапазоні 5-25 Вт. Про перевищення навантаження на ТЕН більше ніж 30 Вт сигналізує світлове табло 13.

Усі вимірювання виконуються при стаціонарному (сталому) режимі протягом певного часу в тепловому стані ТЕНа. Тому після завдання чергового навантаження на ТЕН, необхідно постійно записувати на окремому аркуші покази термопар Т1-Т6. Через деякий час теплові витрати конвекцією та випромінюванням від поверхні ТЕНа в оточуюче середовище досягають постійних значень.

Цей стан фіксується незмінними протягом часу (3-5 хвилин) показами термопар Т1-Т6 і за участю викладача студенти роблять висновок про встановлення сталого теплового режиму труби. Далі при сталому електричному навантаженні на ТЕН проводять три вимірювання температур стінки труби термопарами Т1-Т6 та температури оточуючого повітря t_p рідинним термометром.

Отримані покази приладів заносять в табл. 2, після чого установку переводять на новий тепловий режим і повторюють вимірювання відповідно до викладеної методики.

При проведенні лабораторної роботи, необхідно з'ясувати всі складові для обчислення похибки при визначенні дослідного коефіцієнта тепловіддачі α .

6 ОБРОБКА РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДІВ

В даній роботі досліджується складний теплообмін між нагрітим горизонтальним циліндром і оточуючим середовищем(повітрям), де в якості основного явища розглядається конвективний теплообмін.

Тепловий потік, що передається горизонтальною трубою шляхом конвекції, Вт:

$$Q_K = Q - Q_{\Pi}, \quad (14)$$

де Q - сумарний тепловий потік, що передається в зовнішнє середовище шляхом конвекції та випромінювання і визначається за потужністю W , Вт, нагрівача:

$$Q = W; \quad (15)$$

Q_{Π} - променевий тепловий потік, що передається трубою шляхом теплового випромінювання, Вт:

$$Q_{\Pi} = C_0 F \left[\left(\frac{T_C}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_P}{100} \right)^4 \right] \varepsilon_{\Pi}, \quad (16)$$

де $C_0 = 5,67 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4)$ - коефіцієнт випромінювання абсолютно чорного тіла; F - площа поверхні дослідної труби:

$$F = \pi \cdot d \cdot L ;$$

T_C , T_P - абсолютні середні температури відповідно поверхні дослідної труби та оточуючого повітря для певного режиму, К;

$\varepsilon_n = 1,2 \cdot \varepsilon_o$ - ступінь чорноти поверхні з урахуванням напівсферичного випромінювання; $\varepsilon_o = 0,045$ - ступінь чорноти в напрямі нормалі до поверхні випромінювання; $\varepsilon_n = 0,054$.

Середня температура стінки t_{Ci} в одній серії вимірювань, °С:

$$t_{Ci} = \frac{\sum_{i=1}^6 t_{Ti}}{6}, \quad (17)$$

t_{Ti} - покази термопар Т1-Т6 в одній серії вимірювань температур.

Середня температура стінки t_C в певному режимі, °C:

$$t_C = \frac{\sum_{i=1}^n t_{Ci}}{n}, \quad (18)$$

n - кількість вимірювань температури стінки в одному стаціонарному режимі (зазвичай, можна обмежитись трьома - чотирма вимірюваннями).

Середня температура оточуючого повітря в певному режимі, °C:

$$t_P = \frac{\sum_{i=1}^n t_{Pi}}{n}, \quad (18)$$

де t_{Pi} - покази рідинного термометра.

Отримані значення t_C і t_P заносять в табл. 2 і далі розраховують значення необхідних величин.

Таблиця 2

Результати вимірювань

Номер режиму	Номер серії вимірювання	W , Вт	t_P , °C	Покази термопар, °C					
				T_1	T_2	T_3	T_4	T_5	T_6
1.	1								
	2								
	3								
	середнє								
2.	1								
	2								
	3								
	середнє								
3.	1								
	2								
	3								
	середнє								

Після того, як конвективний тепловий потік визначено, знаходять коефіцієнт тепловіддачі α за рівнянням (7). Результати дослідів справедливі лише для даної дослідної труби, тому необхідно порівняти отримані результати зі значеннями α_p , визначеними з рівнянь (8-11). Фізичні властивості сухого повітря для розрахунку критеріїв подібності обираються з таблиці 4 за визначальною температурою t_M .

Таблиця 3

Результати розрахунків

Номер режиму	W	t_p	t_c	Δt	t_M	Q_{Π}	Q_K	α	α_p
	Вт	$^{\circ}\text{C}$	$^{\circ}\text{C}$	$^{\circ}\text{C}$	$^{\circ}\text{C}$	Вт	Вт	Вт/(м ² ·К)	Вт/(м ² ·К)
1									
2									
3									

Таблиця 4.

Фізичні властивості сухого повітря ($p_0 = 101,3$ кПа)

t	$\lambda \cdot 10^2$	$\nu \cdot 10^6$	Pr
$^{\circ}\text{C}$	Вт/(м·К)	м ² /с	
0	2,44	13,28	0,707
10	2,51	14,16	0,705
20	2,59	15,06	0,703
30	2,67	16,00	0,701
40	2,76	16,96	0,699
50	2,83	17,95	0,698
60	2,90	18,97	0,696
70	2,96	20,02	0,694
80	3,05	21,09	0,692
90	3,13	22,10	0,690
100	3,21	23,13	0,688

7 ОЦІНКА ТОЧНОСТІ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕНЬ

Оцінка обов'язкова, оскільки отримані значення можуть лежати в межах можливої похибки досліду, а виведені закономірності - опинитися неясними і навіть невірними.

Точність є ступенем відповідності результатів вимірювань дійсного значення даної величини. Поняття точності пов'язане з поняттям похибки: чим вище точність, тим менше похибка вимірювань, і навпаки. Найточніші прилади не можуть показати дійсного значення величини, їх покази містять похибку.

Визначення розрахункової похибки середнього коефіцієнта тепловіддачі:

$$\delta_{\pi}(\alpha) = \left(\frac{\Delta W}{W} + \frac{|\Delta T_c + \Delta T_p|}{|T_c - T_p|} + \frac{|\Delta d|}{d} + \frac{|\Delta L|}{L} \right) \cdot 100 .$$

Приймаємо абсолютні похибки вимірювання:

- діаметра $\Delta d = \pm 0,1$ мм,
- довжини $\Delta L = \pm 0,5$ мм,
- температури $\Delta T_c = \pm 0,2$ °С при вимірюванні температури за допомогою термопар та $\Delta T_p = \pm 0,5$ °С при вимірюванні температури за допомогою термометра.

Абсолютна похибка вимірювання потужності у відповідності до класу точності К приладу обчислюється за формулою:

$$\Delta_{\pi}(A) = \frac{K \cdot A_{\text{НОМ}}}{100} .$$

Приклад. Ватметром на 250 Вт ($W_{\text{НОМ}} = 250$ Вт) з класом точності $K = 0,5$ виміряна потужність $W = 50$ Вт. Потрібно визначити граничну абсолютну похибку і відносну похибку вимірювання. Для цього приладу в будь-якій частині шкали допускається абсолютна похибка, рівна 0,5% від верхньої межі вимірювання, тобто від 250 Вт, що становить:

$$\Delta_{\pi}(W) = \frac{K \cdot W_{\text{НОМ}}}{100} = 0,5 \cdot 250 / 100 = 1,25 \text{ Вт} .$$

Гранична відносна похибка виміряної потужності 50 Вт:

$$\delta_p(W) = \frac{\Delta_p(W)}{W} 100 = \frac{1,25}{50} 100 = 2,5 \% .$$

Для перевірки достовірності результатів експериментального визначення коефіцієнта тепловіддачі необхідно порівняти дослідне α і розрахункове значення α_p , тоді відносна похибка дорівнює:

$$\delta(\alpha) = \frac{|\alpha - \alpha_p|}{\alpha_p} \cdot 100 .$$

8 ЗВІТ ПО РОБОТІ

На підставі виконаної роботи скласти звіт, який включає:

1. Стислий опис роботи.
2. Принципову схему експериментальної установки.
3. Протокол запису показів вимірювальних приладів.
4. Результати розрахунків за експериментальними даними та за критеріальним рівнянням.
5. Порівняння коефіцієнтів тепловіддачі, отриманих у процесі експерименту α та розрахункових α_p .
6. Оцінка точності результатів досліджень.

9 КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ

1. Що називається конвективним теплообміном?
2. Які види конвекції ви знаєте?
3. Опишіть механізм виникнення вільного потоку повітря?
4. Сформулюйте визначення вільної конвекції.

5. Назвіть основні фактори, які обумовлюють вільну конвекцію. Їх вплив на інтенсивність тепловіддачі.
6. Назвіть основні режими руху рідини при вільній конвекції в необмеженому просторі.
7. Який фізичний зміст коефіцієнта тепловіддачі?
8. Які величини слід вимірювати при експериментальному визначенні коефіцієнта тепловіддачі?
9. Назвіть загальні умови подібності фізичних процесів (а саме теплообміну) при вільному русі рідини.
10. Якими числами подібності характеризується конвективний теплообмін?
11. Що називають коефіцієнтом тепловіддачі, від яких величин він залежить?
12. Як зміниться чисельне значення критерія Грасгофа, якщо діаметр труби збільшити у два рази? Як це вплине на коефіцієнт тепловіддачі при інших однакових умовах?
13. Зобразіть траєкторії вільного руху повітря біля гарячої горизонтальної труби.
14. Як зміниться коефіцієнт тепловіддачі, якщо труба буде розташована вертикально, а температурний напір залишиться колишнім?
15. Наведіть формули, за якими розраховується тепловий потік при конвективній тепловіддачі.
16. Що називається числами подібності?
17. Яка функціональна залежність між числами подібності при вільній конвекції?
18. Який фізичний зміст чисел подібності: Nu , Gr , Pr .
19. Що називається визначальним розміром і визначальною температурою?
20. Поясніть принцип дії лабораторної установки.
21. Поясніть, чому виміри повинні виконуватися тільки при стаціонарному тепловому режимі?

22. Як визначається температура поверхні тепловіддачі і які пристрої при цьому використовуються?
23. Поясніть методику визначення коефіцієнта C і показника степеня n в критеріальному рівнянні для тепловіддачі при вільній конвекції.

ЛІТЕРАТУРА

1. Исаченко В.П. и др. Теплопередача. - 4-е изд. – М.: Энергоиздат, 1981. – 416с.
2. Константинов С.М. Теплообмін: Підручник. – К.: ВПІ ВПК «Політехнік», 2005. – 304с.
3. Недужий І.А., Алабовський А.Н. Технічна термодинаміка та теплопередача: Навч. посібник для вузів. – 2-е вид. – К.: Вища шк., 1981, – 248 с.
4. Інженерні методи розрахунку похибок при виконанні лабораторних робіт з курсу "Теплообмін та технічна термодинаміка": Методичні вказівки /Укл. В.В. Босий, Г.Н. Васильченко, Є.Н. Панов – К.: КПІ, 1985. – 71 с.